

Technologie D2D

dans l'Aérospatiale

Révolution Connectée : Communications Device-to-Device au service du secteur aérien, spatial et de défense

840 Md\$

Marché mondial
aérospatiale 2023

+20%/an

Croissance D2D
aérospatiale

1–5 ms

Latence D2D vs 50 ms
réseau

–15%

Réduction coûts
maintenance (Airbus)

01 –

Définition & Contexte

La technologie **Device-to-Device (D2D)** désigne un mode de communication pair-à-pair permettant à deux équipements de s'échanger des données **directement**, sans transiter par une infrastructure réseau centralisée (antenne, routeur, serveur). Dans le secteur aérospatial, cette architecture présente un intérêt fondamental : les avions, satellites, drones et équipements au sol peuvent collaborer en temps réel, avec une latence minimale, même en l'absence de couverture réseau terrestre.



Communication In-Band

Le lien D2D utilise le même spectre radio que le réseau cellulaire (bande licenciée LTE/5G). L'infrastructure coordonne l'allocation des ressources tout en laissant les appareils communiquer directement. Utilisé pour les systèmes avioniques critiques où la qualité de service est garantie par l'opérateur.



Communication Out-Band

Le lien D2D utilise une technologie sans fil distincte du réseau cellulaire : Wi-Fi Direct, Bluetooth 5.x, UWB. Moins de contraintes spectrales, mais nécessite la coexistence de plusieurs radios dans l'équipement. Privilégié pour les communications passagers et la maintenance au sol.

"Le D2D n'est pas une amélioration incrémentale des réseaux aéronautiques : c'est un changement de paradigme. En supprimant l'infrastructure comme point de passage obligatoire, on obtient une résilience et une réactivité impossibles autrement."

— Rapport SESAR (Single European Sky ATM Research), 2023

02 —

Évolution dans l'Aérospatiale

- 1990s** ● **ACARS & VHF — les premières communications avion-sol**
Les premières formes de messagerie numérique aéronautique (ACARS – Aircraft Communications Addressing and Reporting System) permettent l'échange de données entre l'avion et le sol en VHF. Précurseur du D2D, mais entièrement médiatisé par une infrastructure.
- 2004** ● **Introduction d'ADS-B — vers le D2D aérien**
L'ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast) permet aux aéronefs de diffuser leur position GPS directement aux autres appareils et aux contrôleurs. Première implémentation massive d'une communication directe avion-à-avion en espace aérien réel.
- 2012** ● **Wi-Fi Direct et premières applications passagers D2D**
L'industrie aéronautique explore Wi-Fi Direct pour les services de divertissement de cabine et la communication entre équipements de bord sans câblage. Airbus teste les premiers réseaux cabin D2D sur A380.
- 2016** ● **C-V2X et convergence avec l'aéronautique**
La 3GPP Release 14 introduit C-V2X (Cellular Vehicle-to-Everything), adapté aux plateformes aériennes pour la communication drone-à-drone et drone-sol. L'OTAN publie ses premières directives sur l'utilisation du D2D dans les drones militaires.
- 2019** ● **5G Sidelink — révolution pour l'aérospatiale**
La 3GPP Release 16 standardise le 5G NR Sidelink. NASA et ESA lancent des programmes de recherche sur l'application du Sidelink aux constellations de satellites LEO. Airbus présente son concept 'Connected Aircraft' basé sur le D2D 5G pour les futurs A320neo.
- 2022** ● **Drones autonomes & communications maillées D2D**
Les armées américaine (DARPA OFFSET) et européenne (EDA) déploient des essaims de drones utilisant des réseaux mesh D2D pour la coordination en vol sans infrastructure. SpaceX intègre des liaisons laser D2D inter-satellites dans la constellation Starlink v2.
- 2024** ● **5G Advanced — D2D natif dans les avions de ligne**
Airbus et Boeing signent des partenariats avec Qualcomm et Ericsson pour intégrer le 5G NR Sidelink comme bus de données avionique de nouvelle génération. L'EASA et la FAA ouvrent des consultations sur la certification du D2D dans les systèmes de vol critiques.

La 6G positionnera le D2D comme mode de communication natif. Les satellites LEO, les drones HAPS (High-Altitude Platform Stations) et les aéronefs formeront un réseau non-terrestre entièrement maillé (NTN D2D) selon la vision ITU-R IMT-2030.

Applications Concrètes



Avionique & Communication Intra-avion

Les capteurs, actionneurs et calculateurs de bord échangent des données en D2D via un bus avionique sans fil (WAIC – Wireless Avionics Intra-Communications). La norme RTCA DO-384 définit ce cas d'usage. Avantages : réduction du câblage (jusqu'à 200 kg économisés sur un A350), fiabilité accrue par redondance sans fil. Boeing 787 utilise déjà un réseau WAIC partiel pour les capteurs de structure.



Drones en Essaim (Swarm D2D)

Des dizaines à des milliers de drones coordonnent leurs trajectoires et missions en temps réel via des réseaux mesh D2D, sans contrôleur central. Chaque drone relaie les informations de ses voisins. Applications : surveillance de zone, livraison autonome (Amazon Prime Air), missions de secours (projet EU IMPETUS), démonstrations militaires DARPA avec 250 drones autonomes en 2023.



Constellations de Satellites (ISL D2D)

Les Inter-Satellite Links (ISL) sont des liaisons D2D entre satellites, permettant de former un réseau maillé orbital. Starlink v2 utilise des lasers D2D à 100 Gbit/s entre satellites, éliminant le besoin de stations sol relais. OneWeb, Amazon Kuiper et Telesat Lightspeed adoptent la même architecture. Latence trans-continentale divisée par 2 par rapport aux liaisons fibres sous-marines.



Maintenance Prédictive Connectée

Les techniciens de maintenance utilisent des tablettes qui dialoguent en D2D Wi-Fi Direct directement avec les boîtiers avioniques pour télécharger les logs de vol et diagnostics sans passer par le réseau de l'aéroport. Airbus déclare une réduction de 15% des coûts de maintenance grâce au D2D. Le projet AEROMACS (Aeronautical Mobile Airport Communication System) standardise ces échanges sur les plateformes aéroportuaires.



Communication d'Urgence & SAR

En cas de détresse (Search And Rescue), les ELT (Emergency Locator Transmitters) de nouvelle génération (ELT-DT) transmettent en D2D vers d'autres aéronefs proches pour relayer l'alerte quand le réseau satellite Cospas-Sarsat est indisponible. Testé lors de l'exercice EU SAREX 2023 avec 12 aéronefs militaires.



Urban Air Mobility (UAM) & eVTOL

Les véhicules aériens urbains (Joby Aviation, Lilium, Volocopter) utilisent le D2D C-V2X et 5G Sidelink pour la coordination entre eVTOL, avec l'infrastructure de vertiport et avec les systèmes UTM (Urban Traffic Management). La FAA et l'EASA exigent des capacités D2D dans les certifications UAM prévues pour 2026.

Comparaison des Technologies D2D Aérospatiales

Technologie	Standard	Portée	Débit	Latence	Usage aérospatial
WAIC (Avionique)	RTCA DO-384 / EUROCAE	Intra-avion	~10 Mbit/s	< 2 ms	Capteurs structure, commandes
ADS-B Direct	ICAO Annex 10 / DO-260B	~200 NM	1 Mbit/s	~0.5 s	Surveillance collision A/A
5G NR Sidelink	3GPP Rel. 16/17	~500 m	> 1 Gbit/s	< 1 ms	eVTOL, smart factory, drones
C-V2X PC5	3GPP Rel. 14+	~1 km	~27 Mbit/s	< 3 ms	Drones urbains, UAM V2X
Wi-Fi Direct	IEEE 802.11ac/ax	~200 m	~1 Gbit/s	5–15 ms	Maintenance, passagers
Laser ISL (D2D sat)	SpaceX / propriétaire	~1 000 km	> 100 Gbit/s	~5 ms	Constellations LEO Starlink
UWB (précision)	IEEE 802.15.4z	~30 m	~27 Mbit/s	< 1 ms	Tracking bagages, RFID précis
LDACS (D2D L-Band)	ICAO / EUROCAE ED-188	~200 NM	~1 Mbit/s	~100 ms	Comm. ATC sol-air digitale

Avantages & Défis



Latence ultra-faible

La suppression de l'infrastructure réduit la latence à 1–5 ms contre 20–50 ms pour les réseaux cellulaires traditionnels. Critique pour les systèmes temps-réel : commandes de vol, évitement de collision, coordination de drones.



Déchargement réseau

Les flux locaux ne consomment plus les ressources des réseaux sol. En vol de croisière, le D2D peut décharger jusqu'à 60% des communications intra-avion, libérant la bande satellite pour les données passagers.



Efficacité énergétique

La puissance d'émission nécessaire pour atteindre un appareil voisin est 10 à 100x inférieure à celle requise pour une antenne sol. Sur un avion, cela se traduit par une réduction de l'empreinte thermique et une économie de masse (moins de câblage).



Résilience critique

En mode autonome, le D2D fonctionne sans infrastructure. Essentiel pour les zones hors couverture (océans, zones arctiques), les missions militaires en environnement dégradé et les situations de catastrophe nécessitant des communications d'urgence.

DÉFIS & OBSTACLES



Interférences EM

Les environnements aéronautiques sont saturés de signaux radio (VHF, radar, TCAS). Le D2D doit coexister sans perturber les systèmes certifiés. Nécessite un blindage composite avancé et des algorithmes de gestion dynamique du spectre.



Cybersécurité

Sans infrastructure centrale, les liaisons D2D sont exposées aux attaques MitM, usurpation et brouillage. Le chiffrement AES-256 et les protocoles d'authentification embarqués (PKI avionique) sont indispensables. La DO-326A (cybersécurité avionique) doit être étendue au D2D.



Certification & Réglementation

L'EASA (CS-25 pour avions de transport) et la FAA (AC 20-153) ne disposent pas encore de cadre complet pour certifier les systèmes D2D critiques. Les processus de qualification peuvent prendre 5 à 10 ans, freinant l'adoption industrielle.

06 —

Acteurs Clés & Projets en Cours

Acteur	Rôle	Projet D2D	Horizon
Airbus	Constructeur avion	Connected Aircraft 5G NR Sidelink (bus avionique)	2026–2028
Boeing	Constructeur avion	WAIC sur 787/777X – réseau capteurs structure sans fil	En prod.
SpaceX	Opérateur spatial	ISL laser D2D Starlink v2 – réseau orbital mesh	En prod.
NASA	Agence spatiale	SABRE – D2D pour rovers et drones sur Mars/Lune	2026–2030

ESA	Agence spatiale	Moonlight / LCNS – communications D2D lunaires	2028+
Joby Aviation	eVTOL	C-V2X D2D pour UAM – coordination vertiport	2025–2026
DARPA	Recherche défense	OFFSET – essais 250 drones D2D mesh autonomes	En cours
Airbus Defence	Défense & espace	EuroMALE – drones MALE avec D2D sécurisé NATO	2027
Qualcomm	Semi-conducteurs	Snapdragon X80 – puce 5G NR Sidelink aérospatiale	2024–2025
Thales	Avionique	TopDeck – système D2D certifié DO-178C pour A320	2027+

07 –

Enjeux Réglementaires & Normatifs

L'intégration du D2D dans l'aérospatiale ne se limite pas à un défi technique : elle impose une refonte partielle du cadre réglementaire international. Plusieurs organismes travaillent simultanément à l'élaboration de normes adaptées.

RTCA / EUROCAE

DO-384 – WAIC

Première norme dédiée aux communications sans fil avioniques intra-avion. Définit les fréquences autorisées (4,2–4,4 GHz), les niveaux de puissance, la coexistence avec les autres systèmes RF. Base réglementaire pour le D2D avionique certifiable.

ICAO

Annexe 10 & ADS-B

L'ICAO impose l'ADS-B Out obligatoire dans la plupart des espaces aériens contrôlés depuis 2020. L'ADS-B In (réception D2D des données des autres aéronefs) n'est pas encore obligatoire mais fortement encouragé. Le programme ICAO SWIM intègre le D2D dans l'architecture ATM future.

EASA / FAA

Certification systèmes D2D

L'EASA travaille sur une extension de la CS-25 et de l'AMC 20-23 pour couvrir les systèmes D2D. La FAA a publié l'AC 20-153B sur la certification des systèmes de communication avionique sans fil. Les deux agences participent au groupe de travail conjoint JARUS sur les drones et l'UAM.

3GPP / ETSI

5G NR Sidelink aérospace

Le groupe de travail SA1 de la 3GPP développe les Release 18/19 avec des exigences spécifiques pour les applications aérospace (haute altitude, mobilité rapide, effet Doppler). L'ETSI TC AERO coordonne les aspects européens.

08 —

Perspectives & Futur (2025–2035)

2025–202

6

Certification des premiers eVTOL avec D2D C-V2X

Joby Aviation, Archer et Lilium visent des certifications FAA/EASA incluant des systèmes D2D C-V2X pour la communication avec les vertiports et les autres eVTOL. Ce sera la première certification de D2D cellulaire dans un avion commercial.

2026–202

8

5G NR Sidelink comme bus avionique de nouvelle génération

Airbus et ses partenaires prévoient d'équiper les futurs A320 avec un réseau WAIC basé sur le 5G NR Sidelink pour remplacer les bus avioniques ARINC 429 sur les équipements non-critiques. Réduction de masse estimée à 300–400 kg par avion.

2028–203

0

Réseaux Non-Terrestres D2D (NTN Mesh)

L'ITU-R IMT-2030 prévoit l'intégration native des plateformes aériennes dans les réseaux cellulaires 6G. Drones HAPS, satellites LEO et avions formeront un réseau maillé D2D à trois couches (sol, HAPS, espace), couvrant 100% de la surface terrestre.

2030–203

5

D2D pour l'exploration spatiale (Lune & Mars)

La NASA (programme Artemis) et l'ESA (Moonlight) développent des protocoles D2D adaptés aux contraintes lunaires : délais de propagation, absence d'atmosphère, exigences de certification spatiale. Les rovers, astronautes et modules orbitaux communiqueront en D2D mesh, sans dépendre d'une station relais unique.

09 —

Sources & Références

3GPP TS 38.300 Rel.17	NR and NG-RAN Overall Description	3gpp.org
RTCA DO-384	Wireless Avionics Intra-Communications (WAIC)	rtca.org
ICAO Annex 10 Vol.III	Communication Systems – ADS-B	icao.int
EASA CS-25 Amdt 27	Certification Specifications for Large Aeroplanes	easa.europa.eu
ITU-R IMT-2030	Framework for International Mobile Telecommunications	itu.int
SESAR JU Report 2023	Digital European Sky – D2D in ATM	sesarju.eu
NASA TM-2022-SABRE	D2D Communications for Lunar Surface Operations	nasa.gov
ESA Moonlight CDF 2023	Lunar Communication & Navigation System	esa.int
Qualcomm White Paper	5G NR Sidelink for Aerial Platforms (2024)	qualcomm.com
Airbus Tech Mag 2024	Connected Aircraft – 5G Sidelink as Avionics Backbone	airbus.com
DARPA OFFSET 2023	Swarm Autonomy with D2D Mesh Communications	darpa.mil
5GAA White Paper 2024	C-V2X for Urban Air Mobility Applications	5gaa.org

"La technologie D2D dans l'aérospatiale n'est plus une promesse — c'est une réalité en déploiement. ADS-B vole déjà, les ISL Starlink transmettent en ce moment même, et les premiers eVTOL C-V2X seront certifiés d'ici 2026. La question n'est plus 'si' mais 'à quelle vitesse' cette révolution connectée transformera l'ensemble de l'espace aérien mondial."

– Synthèse personnelle · BTS SIO SISR · Mars 2026